



TITLE:

CeCoIn5の高磁場超伝導相に関する理論的研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

細谷, 健一

CITATION:

細谷, 健一. CeCoIn5の高磁場超伝導相に関する理論的研究. 京都大学, 2017, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2017-07-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20601>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2017-07-24に公開 (2017-09-19修正)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	細谷 健一
論文題目	CeCoIn5 の高磁場超伝導相に関する理論的研究		
(論文内容の要旨)			
<p>新しいタイプの超伝導相の実現は巨視的量子現象に関する知見を深めることにつながるため、超伝導研究のみならず量子統計物理に関わる重要な題材である。今世紀に入り研究対象となった重い電子系物質 CeCoIn5 は、その顕著な強相関効果に起因して d 波対凝縮による超伝導を示すが、その大きな磁化率により数テスラの磁場下においても明確なパウリ常磁性対破壊効果を示す3次元超伝導体であることが知られている。この特徴により、2003年にその低温高磁場域に発見された奇妙な超伝導(HFLT)相が以前から探求されてきた Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 超伝導状態というパウリ常磁性が誘起する新奇相ではないか、と考えられるようになり、それ以来磁場下のCeCoIn5 は盛んに研究され始めた。しかし、HFLT相での反強磁性秩序の存在が2008年の中性子散乱実験により確認されたのを契機にこの相の正体を理解するには新たな理論的知見が必要との認識が広がった。そしてその後、d 波対凝縮とパウリ常磁性対破壊効果との相乗効果が超伝導相内に FFLO 秩序のみならず、反強磁性秩序をも生み出すという基本原理が理論的に見出され、HFLT相理解のための基本的方向が見えてきたと考えられていた。今回、細谷氏が行った理論研究は、近年磁場下の CeCoIn5 で見いだされた実験事実を説明する理論計算を実行し、上記のパウリ常磁性対破壊に基づいた理論モデルを支持する重要な知見をもたらしたものである。細谷氏の研究内容は大別して、次の2つに分かれる。</p> <p>1) CeCoIn5 は準二次元的な結晶構造をしており、HFLT相はその面に平行な磁場下において見いだされた状態であるが、磁場を二次元面から傾けた状況でこの相の変化を調べることは、HFLT相が反強磁性とFFLOという二つの秩序の共存相であれば二つの秩序が傾けた角度に依存して分離する可能性があるため、大変興味深い。この見地から核磁気共鳴(NMR)測定が行われていたため、細谷氏はその実験事実の解析につながる理論の構築を目指した研究を行った。理論解析には超伝導と反強磁性を平均場近似で扱うが、フェルミ面構造をフルに取り入れて磁場依存性を調べるには、磁場誘起渦糸を無視するパウリ極限モデルが有益である。一方で、FFLO秩序の角度依存性を正しく理解するにはフェルミ面構造のモデルを単純化して渦糸を考慮する連続体モデルが有益である。このため、これら二つのモデルでの解析を別々に行い、理解を深めることを目指した。その結果、細谷氏は反強磁性とd波超伝導の共存の仕方の角度依存性だけでなく、FFLO 秩序と反強磁性秩序の角度依存性に顕著な違いがあり、傾けるとともに反強磁性秩序のないFFLO 秩序が HFLT 相を占めるという理論結果を導くことに成功した。これはNMR 測定から予想された磁場—温度相図を良く説明することとなり、パウリ常磁性対破壊に基づくHFLT相の理論を支持する結果である。</p> <p>2) 2016年に海外で報告された熱伝導測定により、HFLT相ではパイートリプレットという特殊な対凝縮秩序が生じていることが提案された。この実験結果は、当初 FFLO 相とHFLT 相とを同一視する理論モデルでは説明が困難と考えられたが、パイートリプレット秩序はそれ自身で起こらなくても d 波超伝導と反強磁性という二つの秩序が実現する状況では自動的に誘起される秩序であることに立脚して、細谷氏はパウリ常磁性対破壊に基づく理論モデルの単純な拡張で熱伝導実験の結果は無理なく説明できることを示し、自由エネルギーを下げるパイートリプレット秩序が熱伝導実験を説明することを具体的に示した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

電子相関の強い系で実現される重い電子系超伝導では対凝縮する電子の有効質量が大きいため、対凝縮対称性がd波になるだけでなくゼーマン効果が著しく強まり、そのため、磁場下でパウリ常磁性対破壊効果が無視できなくなる。強いパウリ常磁性対破壊効果を示す CeCoIn5 という超伝導物質の高磁場低温域で生じている超伝導相(HFLT相)はパウリ常磁性効果が誘起した反強磁性秩序と空間変調超伝導(FFLO)秩序とが共存した相であると考えられており、2003年に発見されて以来、理論と実験の両面から国際的に関心を集める新奇超伝導の問題の代表例となっている。細谷氏は、この磁場下の超伝導物理の問題の理論的理解に関して、大きく分けて2つの切り口から今後重要な役割を担う成果を出したと考えられる。本論文は、[1] 磁場方向を準2次元面から傾けた際のHFLT 相の安定性、及び反強磁性と FFLO 秩序の分離、[2] HFLT 相内で反強磁性に付随して生じるスピン三重項超伝導秩序の同定と特徴の解明、という2つの成果からなる。以下、項目ごとに記述する。

CeCoIn5 のHFLT相は基本的に二次元面に平行な磁場下で起こる状態である。そこで、研究課題[1]として、面内方向から磁場方向を傾けてパウリ常磁性効果を有効的に弱めた際のHFLT相の変化を調べることで、HFLT相の真の姿を明らかにするという数件の実験的試みがなされたのに基づき、細谷氏は d 波超伝導と反強磁性の秩序を平均場として導入したモデルを解析した。具体的には、磁場誘起渦による効果とフェルミ面の詳細による電子状態の効果をモデルに独立に含めた複雑な解析を辛抱強く実行し、磁場方向を傾けた際に反強磁性が FFLO 秩序とは独立に失われるべきであることを主張し、反強磁性を持たない FFLO 相が傾けた磁場下では実現すると結論付けた。これは、磁化測定の実験と磁歪実験との間でみられた実験的相図に関する不一致を見事に説明する結果である。さらに、磁場方向が面平行方向から傾くとともに反強磁性秩序の方がより失われやすいことの原因が磁場方向変化によるネスティング条件の悪化にあることを詳細に説明してみせた。相図という統計力学的な面とともに電子状態の詳細という微視的な側面にも踏み込んだ解析を伴った完成度の高い理論研究となっていると判断した。

一方、[2]で細谷氏は、2016年度に報告された熱伝導測定の解釈にとって、パウリ常磁性対破壊を HFLT 相出現の主因とする理論での相図決定においては本質的役割を果たさなかったパイートリプレットと呼ばれるスピン三重項秩序を考慮することが不可欠であるという点に着目し、これまでの理論をパイートリプレット秩序を含む形に拡張することを実行した。特に、熱伝導実験を行った研究グループがその解釈の際において設けた、面内磁場方向が[100]方向の状況を境にパイートリプレット秩序のノード方向が不連続に変化するという仮定が、実際の物質の結晶構造に合わせた超伝導対称性に基づくモデルでは不要であることを細谷氏は見ぬいた。これは、実験事実と符合する理論的理解が飛躍的に進むためには欠かせない重要なステップであったと判断される。細谷氏はこの着目点に基づき、パイートリプレット秩序はパウリ常磁性対破壊による反強磁性秩序と母体の超伝導秩序である d 波対状態とにぶら下がる形で生じる付加的な秩序で、これが熱伝導測定で見いだされたという見方を、実験事実を具体的な微視的側面の計算に基づいて説明することにより確立した。

以上の結果は、10年以上にわたって未解決であった新奇超伝導相の問題を解き明かす上で重要な理論的進展を与えたという、独創性の高い研究成果であり、今後実験事実の解析にとって重要な役割を果たすと期待できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年3月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 平成 年 月 日以降